中国生态农业学报 2016 年 7 月 第 24 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 926−934



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160156

# 基于 Hybrid-maize 模型的吉林省不同生态区玉米产量潜力研究*

曹玉军[1,2] 吕艳杰[1] 王晓慧[1] 魏雯雯[1] 姚凡云[1] 刘春光[1] 王立春[1] 王永军[1**]

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室 长春 130033;
2. 东北农业大学农学院 哈尔滨 150030)

**摘 要** 为挖掘玉米产量潜力，进一步提升玉米综合生产能力，利用在东北地区已验证的 Hybrid-maize 模型及多年气象数据对吉林省不同生态类型区[东部湿润生态区(桦甸)、中部半湿润生态区(公主岭)、西部半干旱生态区(乾安)]不同品种、播期和密度及其相互组合下的玉米产量潜力进行模拟，并对影响玉米高产稳产的因素进行定量分析，同时考虑产量潜力变异情况及品种本身的生产特性，构建了吉林省不同生态区玉米高产体系。研究结果表明：1)改变播期是一项重要的增产措施，不同生态区的表现不同，湿润区应选择早播，播种日期在 4 月 20 日左右较适宜，而半湿润和半干旱地区应尽量晚播，适宜播期应在 5 月中旬左右。2)不同生态区对密度的容纳能力表现为湿润区(桦甸)>半湿润区(公主岭)>半干旱区(乾安)，3 个地区的适宜密度分别为 90 000 株·hm$^{-2}$、80 000 株·hm$^{-2}$和 75 000 株·hm$^{-2}$左右。3)选用生育期更长的品种表现出了较高的增产潜力，生产上应根据不同区域生态条件，尽量选择晚熟品种，在当前播期条件下半湿润和半干旱地区品种生育期内需要的有效生长积温(GDD)可增至 1 600 ℃以上。4)与当前生产技术相比，将播期、密度、品种三者优化组合，高产体系长期平均产量潜力可增产 14.39%~29.23%。本研究可为吉林省玉米高产措施的正确应用提供理论依据，为玉米产量大面积提升提供技术参考。

**关键词** Hybrid-maize 模型 生态区 玉米 产量潜力 高产栽培体系 吉林省
**中图分类号:** S126; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)07-0926-09

# Analysis of yield potential of maize in different ecological regions in Jilin Province using Hybrid-maize model*

CAO Yujun[1,2], LYU Yanjie[1], WANG Xiaohui[1], WEI Wenwen[1], YAO Fanyun[1], LIU Chunguang[1], WANG Lichun[1], WANG Yongjun[1**]

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences / State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033, China; 2. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract** Jilin Province is an major maize production area in China and it significantly contributes to national food security. Because of limited cultivatable land and adjustment of planting structure, the potential to increase maize planting area in Jilin Province is limited. Future increase in maize yield will mainly rely on yield improvement per cultivated unit area. Thus fully promoting the potential of maize production and per unit area yield constitutes an effective way of comprehensively improving maize productivity in Jilin Province. In this study, the Hybrid-maize model validated in Northeast China and long-term

* 国家科技支撑计划课题(2013BAD07B02)、国家现代农业产业技术体系(CARS02-17)和吉林省科技发展计划(20150519010JH, LFGC14217)资助
** 通讯作者: 王永军，主要研究方向为作物生理生态。E-mail: yjwang2004@126.com
曹玉军，主要从事玉米生理生态研究。E-mail: caoyujun828@163.com
收稿日期: 2015−12−20 接受日期: 2016−03−28

* Funded by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD07B02), the National Modern Agriculture Industry Technology System (CARS02-17) and the Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20150519010JH, LFGC14217)
** Corresponding author, E-mail: yjwang2004@126.com
Received Dec. 20, 2015; accepted Mar. 28, 2016

meteorological data combined with results of experiments of different maize varieties, sowing dates and planting densities were used to simulate maize potential yield in different ecological regions [humid region (Huadian), semi-humid region (Gongzhuling) and semi-arid ecological region (Qian'an)] in Jilin Province. At the same time, the driving factors of high and stable maize yield were analyzed based on potential yield variations and production characteristics of maize varieties. Finally, a high-yield system of maize was established. The main results of the study showed that: 1) Changing sowing date was a critical measure for yield increase. However, there were differences in performance among different ecological regions. Early sowing was required in humid region (Huadian), and the appropriate sowing date was about April 20. In contrast, late sowing was required in the other two ecological regions, with proper sowing times in mid-May. 2) The order of maize tolerance to high planting density for the different ecological regions in Jilin Province was: humid region (Huadian) > semi-humid region (Gongzhuling) > semi-arid region (Qian'an). The suitable densities in the three regions were 90 000, 80 000 and 75 000 plants·hm$^{-2}$, respectively. 3) Variety with longer growth period had higher yield potential. In practice, late-maturing variety selection depended on different regional ecological conditions. In semi-humid and semi-arid regions, it was necessary to increase GDD varieties to over 1 600 ℃ under current sowing date conditions. 4) According to the above results, the comprehensively optimized management measure for high-yield system was established, and the simulated long-term average yield potential of high-yield system increased by 14.39%–29.23% compared with the current production system. The study provided theoretical basis for proper cultivation measures of high-yield crop varieties. It also provided technical reference for large-scale production of maize in Jilin Province.
**Keywords** Hybrid-maize model; Ecological region; Maize; Yield potential; High-yield system; Jilin Province



吉林省是我国重要的玉米生产基地，玉米种植面积达 340 多万 hm$^2$，总产 2 800 余万 t，单产达 7 900 kg·hm$^{-2}$，其种植面积、总产量分别占全国的 12%和 15%[1]，单产、人均占有量、商品量、调出量、出口量连续多年居全国首位[2]，为保障国家粮食安全做出了重要贡献。由于耕地资源限制及种植业结构调整，吉林省玉米播种面积增加的可能性已经不大，未来玉米产量增加将主要依靠提高单产，因此充分发掘玉米生产潜力、提高单产是稳步提升吉林省玉米综合生产力的有效途径[3–4]。作物生产潜力是指一个地区的作物在理想环境下所能达到的最高理论产量，一般把光温生产潜力作为一个地区的作物产量上限[5]。它是科学评价一个地区粮食生产能力和发展前景的重要指标，对评价该地区粮食生产能力和人口承载能力，进而指导粮食生产具有重要的参考价值[6–7]。

近年来在政策和科技支撑下，玉米高产潜力得到了进一步提升，高产典型不断出现，示范面积也不断加大[8–9]。但过去高产研究中产量潜力的突破主要是采取不同栽培措施或不同水肥用量实现[10–13]，但对影响过程和原因关注不够，对高产潜力挖掘的关键技术和技术体系形成还处在探索阶段，从而导致某些单一研究结果难以形成规律性结论[14]。作物生长模拟模型是对作物品种、环境和作物管理措施交互作用下作物生长动态过程的定量化描述和预测，已成为当前作物科学研究、管理和决策分析的重要工具[5–6,15]。

前人利用相关模型对不同地区的玉米生产潜力进行了较多的验证与应用，如吴绍洪等[16]利用 PS123 模型模拟了黑龙江省海伦市的玉米光温生产潜力；王静等[17]利用前人在东北地区已验证的 APSIM 模型研究了黑龙江省春玉米不同水平产量潜力及产量差的时空分布；李军、戴明宏等[18–19]分别在黄土高原地区和华北平原地区对 CERES-Maize 模型进行了验证，并利用模型对当地玉米生产潜力进行了估算与分析。上述模型的应用在农业生产中发挥了积极的作用，但这些模型的主要缺陷在于需要输入参数较多，且所需的某些作物特性数据不易获取，在一定程度上限制了这些模型的应用。

近年来, Hybrid-maize 模型在我国应用较为广泛，该模型的产生基于大量的田间试验基本数据，对光温资源环境变化较为敏感，需要输入的参数少，模拟准确度高[20]。其主要的应用包括：利用长期的气象数据来评价目标地点的产量潜力和产量潜力变异；评价不同品种、播期和密度相互组合下可获得的产量，用于确定合理栽培措施配置；用于理解现有的玉米高产原因和低产的限制因素。该模型在黄土旱塬及东北平原等其他地区的适应性前人已经过校验和应用[6,21–23]，但前人的研究多是对模型在不同区域适应性的验证、产量潜力及产量差评估等。本文利用在东北地区已验证的 Hybrid-maize 模型对吉林省不同生态区的玉米产量潜力进行模拟，同时对影响玉米高产稳产的因素进行定量的分析，进而构建吉林省不同生态区玉米高产体系，以期为吉林省玉米高产措施的正确应用和玉米高产由点到面的突破提供理论与技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 Hybrid-maize 模型介绍

Hybrid-maize 模型是由美国内布拉斯加州林肯

大学的研究团队在 2004 年研发出的玉米生长模型。其显著特点是将以往国际上有代表性的两种玉米生长模拟方法进行拟合，进而优势互补，从而产生出“杂种优势”效果[18]。该模型用于模拟玉米在水分限制(雨养)与无水分限制(灌溉)条件下的玉米潜在生长、发育、光合同化、同化物分配和产量形成。它以每日为步长，温度为玉米生长发育、冠层光合、器官生长和维持呼吸的驱动因子，这些模拟特点使玉米生长对环境条件的变化具有更为敏感的响应，同时需要输入较少的参数。模型所需主要气象数据包括当年或长期的每日太阳辐射、最高气温、最低气温、降雨量、平均风速与平均相对湿度，气象数据来源为试验点所在地区气象站，模拟时需要输入玉米播种日期、播种密度与品种生育期内需要的有效生长积温(GDD)。该模型在美国[24–25]、印度尼西亚[26]和中国的很多地区已得到广泛的验证和应用[21–23]。

### 1.2 研究地点及情景模拟

为了理解吉林省不同生态区玉米产量潜力的时空变异特性，本研究选择不同生态区具有代表性的试验点进行模拟：湿润生态类型区，东部桦甸(42°34′N , 127°02′E)，北温带大陆性季风气候，年平均日照时数 2 379 h，年平均气温 3.7 ℃，10 ℃以上活动积温 2 731 ℃，平均无霜期 125 d，年平均降水 748.1 mm，且多集中于 7、8 月份；半干旱生态类型区，西部乾安(45°01′N，124°02′E)，中温带大陆性季风气候，光热资源充足，年平均日照时数 2 867 h，年均气温 5.6 ℃，活动积温 2 885 ℃，平均无霜期 146 d，年平均降水量不足 400 mm，蒸发量 1 875 mm；半湿润生态类型区，中部公主岭(43°24′N，125°18′E)，属温带大陆性季风气候，年平均日照时数 2 712 h，年平均气温 5.5 ℃，活动积温 2 770 ℃，年平均降水量 594.8 mm，平均无霜期 144 d。模型所需气象数据来源于试验点当地气象站，共 10 年(2004—2013 年)的数据。太阳辐射量数据由日照时数计算而来，蒸发量数据由平均风速利用模型计算获得，其他管理信息输入依据研究地点和分析目的进行相应设置。

本研究设置 2 种模拟措施：高产体系构建措施与当前管理措施(对照)。当前管理措施(依据有关农民栽培管理水平的相关报道及农户调查)：品种为吉林省不同生态区广泛种植的玉米品种‘先玉 335’，全生育期 GDD 为 1 518 ℃，播种日期为 4 月 30 日，种植密度为 60 000 株·$hm^{-2}$。高产体系构建措施：1)播期研究自 4 月 20 日开始，每 10 d 进行一次模拟，湿润区至 5 月 20 日，半湿润区和半干旱区至 5 月 30 日，其种植密度设为 60 000 株·$hm^{-2}$，品种 GDD=1 518 ℃；2)不同生态区密度研究均设 5 个梯度，分别为 45 000 株·$hm^{-2}$、60 000 株·$hm^{-2}$、75 000 株·$hm^{-2}$、90 000 株·$hm^{-2}$、105 000 株·$hm^{-2}$，播种日期设为 4 月 30 日，品种 GDD 为 1 518 ℃；3)不同生育期品种研究设 4 个梯度，分别为 GDD=1 100 ℃、1 300 ℃、1 500 ℃、1 700 ℃，播种日期设为 4 月 30 日，种植密度设为 60 000 株·$hm^{-2}$。

### 1.3 数据处理与统计分析

用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理与作图，SPSS 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 播期优化对玉米产量的影响

为了详细探明吉林省不同生态区通过播期调整引起光温配置变化对玉米产量潜力的影响，并确定不同生态区的最佳播期，本研究利用不同生态区 10 年的长期气象数据作为数据输入，对设定的当前品种和种植密度下播期改变的产量潜力进行模拟。结果表明，不同生态区在播种窗口随播期改变产量的效应情况存在明显的不同(图 1)。位于吉林省东部湿润区的桦甸因整个生育期气温较低，所以对当前生产使用品种的播种日期选择范围较小，模拟结果表明，在湿润区的桦甸 4 月 20 日播种产量最高，随着播期推迟产量潜力逐渐降低，如果播期推迟至 5 月 20 日，受霜冻的影响，玉米生育期明显缩短，长期平均产量比 4 月 20 日播种降低 1.60 t·$hm^{-2}$。在半湿润公主岭地区，随着播期推迟产量逐渐增加，5 月 20 日产量达最高，主要是因为生殖生长期较低的温度延长了籽粒灌浆持续期(表 1)，从而使籽粒产量增加，如果播期推迟至 5 月 30 日，虽然籽粒灌浆时间明显延长，但可能受霜冻和总辐射量降低的影响，玉米产量下降。而在西部半干旱区的乾安同样适宜晚播，5 月 30 日比 4 月 30 日播种产量高 2.0 t·$hm^{-2}$，但霜冻的风险率达 60%，所以适时推迟播期可以增加产量，但推迟太晚其产量变异较大。

### 2.2 群体密度增加对玉米产量的影响

增密是扩库增源的重要措施，也是增加产量潜力的重要手段。在当前玉米品种和播期条件下，通过调控密度来探讨增加产量潜力的可能性，结果如图 2 和表 2 所示。玉米产量潜力随着种植密度的增加而增加，当密度增加到一定程度后产量潜力开始下降，不同生态区产量潜力对密度的反应有所差别。湿润区 90 000 株·$hm^{-2}$ 时产量潜力最高，比

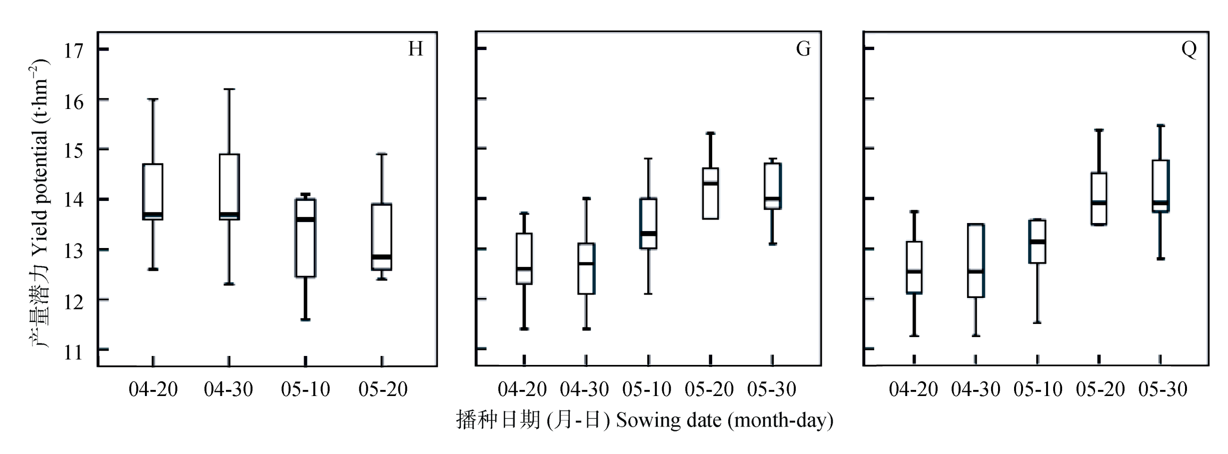



**图 1　吉林省不同生态区在当前品种和密度下播期改变的玉米产量潜力模拟效应**

Fig. 1　Simulated maize yield potentials for different planting dates under the current variety and density in different ecological regions of Jilin Province

图中 H、G、Q 分别表示湿润区、半湿润区和半干旱区，下同。 H, G and Q in the figures mean the humid region, semi-humid region and semi-arid region, respectively. The same below.



**表 1　吉林省不同生态区当前种植密度和品种下不同播期气象条件的变化及其对玉米生长和产量潜力的影响**

Table 1　Effect of planting date on maize growth and yield potential under the current variety and planting density, and on weather conditions in different ecological regions of Jilin Province

| 生态区 Ecological region | 播种日期(月–日) Planting date (month-day) | 产量潜力 Yield potential ($t \cdot hm^{-2}$) | 变异系数 Coefficient of variance (%) | 收获指数 Harvest index | 全生育 Whole growth stage | | 营养生长 Vegetative growth stage | | 生殖生长 Reproductive growth stage | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 总辐射 Total solar radiation ($MJ \cdot m^{-2}$) | 天数 Duration (d) | 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 天数 Duration (d) | 日均温度 Daily mean temperature (℃) |
| 湿润区 Humid region | 04-20 | 14.2 | 9.0 | 0.47 | 18.5 | 3 022 | 93 | 18.1 | 77 | 18.9 |
| | 04-30 | 13.9 | 8.0 | 0.47 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| | 05-10 | 13.5 | 9.0 | 0.46 | 19.2 | 2 699 | 77 | 20.1 | 76 | 18.4 |
| | 05-20 | 12.6 | 9.0 | 0.44 | 19.6 | 2 519 | 70 | 21.1 | 73 | 18.1 |
| 半湿润区 Semi-humid region | 04-20 | 12.9 | 6.0 | 0.47 | 20.4 | 2 755 | 84 | 19.0 | 61 | 22.4 |
| | 04-30 | 13.0 | 7.0 | 0.47 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| | 05-10 | 13.9 | 8.0 | 0.49 | 21.0 | 2 595 | 70 | 21.1 | 68 | 21.0 |
| | 05-20 | 14.3 | 7.0 | 0.51 | 21.0 | 2 529 | 64 | 22.1 | 73 | 20.1 |
| | 05-30 | 13.9 | 6.0 | 0.50 | 20.3 | 2 471 | 60 | 22.8 | 79 | 18.3 |
| 半干旱区 Semi-arid region | 04-20 | 11.7 | 9.0 | 0.47 | 20.6 | 2 469 | 81 | 18.8 | 57 | 23.1 |
| | 04-30 | 11.8 | 9.0 | 0.47 | 21.4 | 2 346 | 73 | 20.1 | 58 | 22.9 |
| | 05-10 | 12.5 | 11.0 | 0.49 | 21.7 | 2 266 | 66 | 21.1 | 61 | 22.3 |
| | 05-20 | 13.2 | 9.0 | 0.51 | 21.7 | 2 221 | 61 | 22.3 | 67 | 21.2 |
| | 05-30 | 13.8 | 7.0 | 0.53 | 20.9 | 2 224 | 57 | 23.1 | 77 | 19.3 |

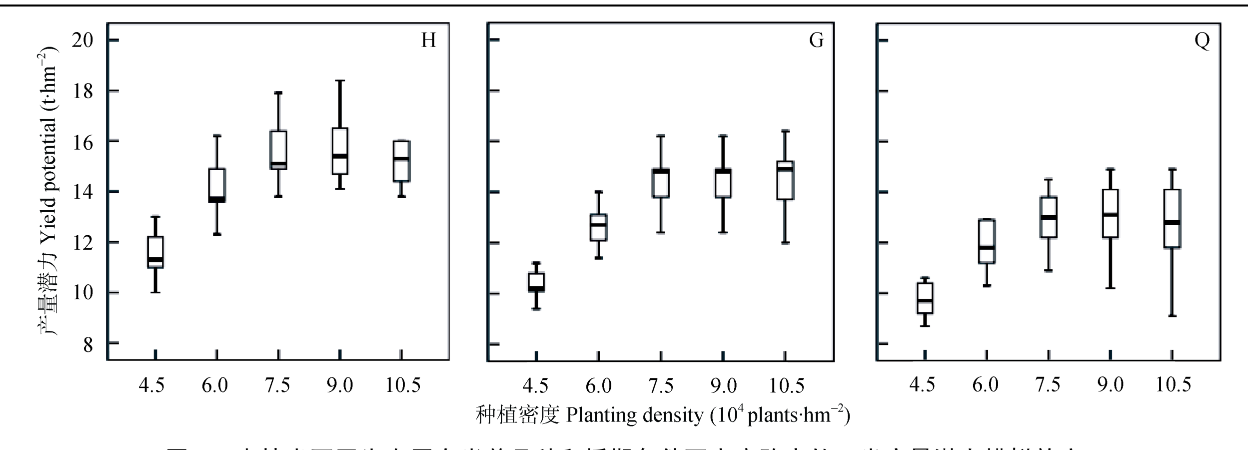



**图 2　吉林省不同生态区在当前品种和播期条件下密度改变的玉米产量潜力模拟效应**

Fig. 2　Simulated yield potentials for different planting densities under the current variety and planting date in different ecological regions in Jilin Province

表 2 吉林省不同生态区气象条件的变化和种植密度对玉米生长和产量潜力的影响

Table 2 Effect of planting densities on maize growth and yield potential and weather conditions in different ecological regions in Jilin Province

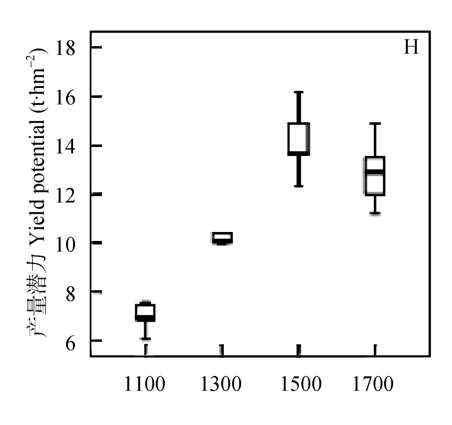
| 生态区 Ecological region | 种植密度 Planting density ($10^4$ plant·hm$^{-2}$) | 产量潜力 Yield potential (t·hm$^{-2}$) | 变异系数 Coefficient of variance (%) | 收获指数 Harvest index | 全生育 Whole growth stage 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 全生育 Whole growth stage 总辐射 Total solar radiation (MJ·m$^{-2}$) | 营养生长 Vegetative growth stage 天数 Duration (d) | 营养生长 Vegetative growth stage 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 生殖生长 Reproductive growth stage 天数 Duration (d) | 生殖生长 Reproductive growth stage 日均温度 Daily mean temperature (℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 湿润区 Humid region | 4.5 | 11.4 | 8.0 | 0.43 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| | 6.0 | 13.9 | 8.0 | 0.47 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| | 7.5 | 15.4 | 8.0 | 0.48 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| | 9.0 | 15.9 | 9.0 | 0.46 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| | 10.5 | 15.3 | 10.0 | 0.44 | 19.0 | 2 860 | 84 | 19.2 | 76 | 18.8 |
| 半湿润区 Semi-humid region | 4.5 | 10.6 | 6.0 | 0.44 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| | 6.0 | 13.0 | 7.0 | 0.47 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| | 7.5 | 14.5 | 9.0 | 0.49 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| | 9.0 | 14.7 | 10.0 | 0.47 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| | 10.5 | 14.5 | 12.0 | 0.45 | 21.1 | 2 627 | 76 | 20.2 | 62 | 22.1 |
| 半干旱区 Semi-arid region | 4.5 | 10.1 | 7.0 | 0.44 | 21.2 | 2 425 | 75 | 20.2 | 60 | 22.5 |
| | 6.0 | 12.3 | 8.0 | 0.48 | 21.2 | 2 425 | 75 | 20.2 | 60 | 22.5 |
| | 7.5 | 13.4 | 9.0 | 0.48 | 21.2 | 2 425 | 75 | 20.2 | 60 | 22.5 |
| | 9.0 | 13.3 | 12.0 | 0.45 | 21.2 | 2 425 | 75 | 20.2 | 60 | 22.5 |
| | 10.5 | 12.9 | 15.0 | 0.42 | 21.2 | 2 425 | 75 | 20.2 | 60 | 22.5 |

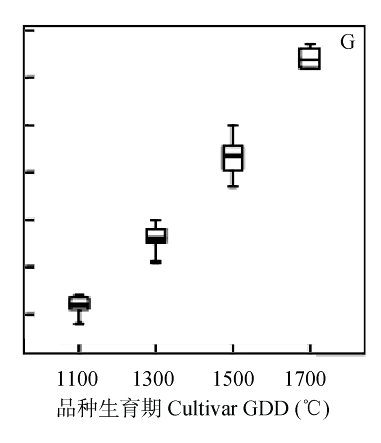
75 000 株·hm$^{-2}$种植密度高 0.5 t·hm$^{-2}$; 半湿润区同样也是 90 000 株·hm$^{-2}$时产量潜力最高, 但与 75 000 株·hm$^{-2}$密度之间差异较小; 而在半干旱区域的乾安, 玉米产量潜力在 75 000 株·hm$^{-2}$时达最高, 进一步增密玉米产量潜力逐渐下降。从收获指数上也可以反映出玉米产量潜力对密度变化的响应, 即在适宜的密度范围内, 随着密度的增加各生态区玉米收获指数呈升高趋势, 各地区均以 75 000 株·hm$^{-2}$种植密度为最高, 继续增加密度, 收获指数明显下降。同时随着密度的增加玉米产量变异也呈增大趋势, 种植密度越大产量变异越大。不同生态区不同种植密度的产量潜力均表现为湿润区桦甸最高, 半干旱区乾安最低, 这与在当前品种和播期条件下桦甸地区的生育期平均温度较低, 玉米生育期更长, 有更多的光辐射有关。

综上可知, 吉林省不同生态区对玉米高密度的容纳能力表现为湿润区(桦甸)>半湿润区>(公主岭)>半干旱区(乾安)。在当前生产条件下对密度增加的产量反应看, 各地区的种植密度在 75 000~90 000 株·hm$^{-2}$之间较合理, 最高不要超过 90 000 株·hm$^{-2}$。

**2.3** 不同生育期品种选择对玉米产量的影响

不同熟期品种的选择对生物量和产量的积累具有显著影响, 合理的品种选择对促进玉米稳产增产具有重要意义。本部分以当前的播种日期和种植密度作为管理输入, 研究不同熟期品种选择对不同生态区光温资源利用和产量潜力的变化, 结果如图 3 和表 3 所示。尽管所选试验地点的纬度差异不大, 但不同生态区对品种熟期的选择范围还是有所差异。冷凉湿润区的桦甸由于整个生育期积温较低, 因此可适应的品种生育期选择范围较窄, 在当前的播种日期, 其品种 GDD 应为 1 400~1 500 ℃较合理, 当 GDD 超过 1 600 ℃时, 霜冻风险达 100%, 导致产量迅速下降。而在半湿润、半干旱区的公主岭和乾安两地可容纳的品种 GDD 可至 1 700 ℃, 产量潜力分别高达 16.4 t·hm$^{-2}$和 15.6 t·hm$^{-2}$, 但此时分别有 50%和 40%的霜冻风险。总体而言, 不同生态区随着品种熟期的延长产量潜力呈增加趋势, 同样的品种在公主岭地区产量潜力更高, 可能是因为生育期内公主岭地区太阳总辐射量较其他地区偏高。在适宜范围内, 桦甸地区 GDD 平均每增加 100 ℃, 品种生育期可延长 19 d 左右, 产量潜力增加约 1.83 t·hm$^{-2}$; 公主岭和乾安地区, 随着品种 GDD 的增加产量增加速率基本相同, 平均每增加 100 ℃, 生育期可延长 12 d 左右, 产量潜力增加约 1.70 t·hm$^{-2}$。





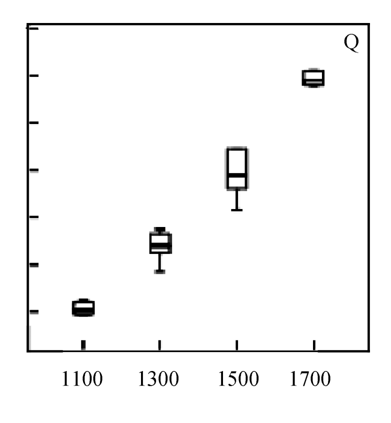



**图 3**　吉林省不同生态区不同玉米品种在当前种植密度和播期下的产量潜力模拟效应

Fig. 3　Simulated yield potential of different maize varieties under the current planting date and planting density in different ecological regions in Jilin Province

**表 3**　吉林省不同生态区不同生育期玉米品种在当前种植密度和播期条件下生长和产量潜力及气象情况

Table 3　Growth and yield potential of different maize varieties under the current planting date and density and weather conditions in different ecological regions in Jilin Province

| 生态区 Ecological region | 品种 GDD Cultivar GDD (℃) | 产量潜力 Yield potential (t·hm$^{-2}$) | 变异系数 Coefficient of variance (%) | 收获指数 Harvest index | 全生育 Whole growth stage | | 营养生长 Vegetative growth stage | | 生殖生长 Reproductive growth stage | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 总辐射 Total solar radiation (MJ·m$^{-2}$) | 天数 Duration (d) | 日均温度 Daily mean temperature (℃) | 天数 Duration (d) | 日均温度 Daily mean temperature (℃) |
| 湿润区 Humid region | 1 100 | 6.7 | 8.0 | 0.38 | 20.2 | 2 080 | 38 | 18.5 | 38 | 23.2 |
| | 1 300 | 10.2 | 6.0 | 0.43 | 20.1 | 2 422 | 52 | 18.9 | 52 | 22.0 |
| | 1 500 | 14.0 | 8.0 | 0.47 | 19.1 | 2 845 | 76 | 19.2 | 76 | 19.0 |
| | 1 600 | 13.6 | 10.0 | 0.45 | 18.8 | 2 895 | 87 | 19.3 | 77 | 18.3 |
| | 1 700 | 12.7 | 11.0 | 0.41 | 18.8 | 2 895 | 74 | 19.5 | 74 | 18.1 |
| 半湿润区 Semi-humid region | 1 100 | 6.3 | 6.0 | 0.40 | 21.1 | 1 937 | 63 | 19.5 | 36 | 23.9 |
| | 1 300 | 9.2 | 7.0 | 0.44 | 21.4 | 2 225 | 69 | 19.8 | 46 | 23.7 |
| | 1 500 | 12.6 | 6.0 | 0.47 | 21.1 | 2 589 | 75 | 20.1 | 60 | 22.3 |
| | 1 600 | 15.1 | 6.0 | 0.50 | 20.5 | 2 846 | 78 | 20.3 | 73 | 20.9 |
| | 1 700 | 16.4 | 6.0 | 0.51 | 19.7 | 3 063 | 81 | 20.4 | 87 | 19.1 |
| 半干旱区 Semi-arid region | 1 100 | 6.0 | 8.0 | 0.40 | 21.2 | 1 805 | 63 | 19.6 | 36 | 24.1 |
| | 1 300 | 8.7 | 7.0 | 0.45 | 21.5 | 2 066 | 69 | 19.9 | 45 | 23.9 |
| | 1 500 | 11.8 | 8.0 | 0.47 | 21.3 | 2 383 | 75 | 20.2 | 58 | 22.7 |
| | 1 600 | 14.4 | 8.0 | 0.51 | 20.6 | 2 641 | 78 | 20.4 | 73 | 21.0 |
| | 1 700 | 15.6 | 8.0 | 0.51 | 20.0 | 2 813 | 81 | 20.5 | 84 | 19.6 |

### 2.4　吉林省不同生态区玉米高产体系构建

综合以上单一措施研究不同地点的产量潜力效应变化情况，以产量潜力和产量潜力变异为主要依据，同时考虑实际操作的可行性及品种本身的生产特性，对吉林省不同生态区的高产体系进行设计。通过模型模拟对不同生态区单一措施不同方案的对比表明(表 4)，在湿润区(桦甸)，主要以早播和增加密度为主要手段，高产方案最终可确定为：播期 4 月 20 日，品种选择为当前品种‘先玉 335’，GDD 1 518 ℃，种植密度为 90 000 株·hm$^{-2}$。而在半湿润区(公主岭)和半干旱区(乾安)，为充分利用其好的光温资源，使用当前品种主要以推迟播期为主要手段，两地区播期应推迟到 5 月中旬左右，种植密度分别在 80 000 株·hm$^{-2}$ 和 75 000 株·hm$^{-2}$ 左右。若以当前生产的播种日期，生产上选用生育期更长的品种将有助于玉米产量潜力的进一步提升。通过模型模拟表明：半湿润和半干旱区地区品种 GDD 可延长至 1 600 ℃，半干旱区可更高。模拟结果显示与当前的体系相比(表 4)，高产体系长期平均产量潜力可以增加产量 14.39%~29.23%，其中以湿润区的增产潜力最小，这与其生育期间的热量较低，可调控的空间较小有关。而半湿润和半干旱区因其优化了播期、

表 4 吉林省不同生态区的玉米高产体系设计及增产潜力
Table 4 Design for high-yield systems and yield potential of maize in different ecological regions in Jilin Province

| 生态区 Ecological region | 栽培模式 Cultivation system | GDD (℃) | 播期(月-日) Sowing date (month-day) | 密度 Density ($10^4$ plants·hm$^{-2}$) | 模拟产量潜力 Simulated yield potential | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 长期平均 Long-term mean (t·hm$^{-2}$) | 变异系数 Coefficient of variance (%) | 高产体系增加率 Increase rate of high yield system (%) |
| 湿润区 Humid region | 当前 Current | 1 518 | 04-30 | 6.0 | 13.9 | 8 | — |
| | 高产体系 High yield | 1 518 | 04-20 | 9.0 | 15.9 | 10 | 14.39 |
| 半湿润区 Semi-humid region | 当前 Current | 1 518 | 04-30 | 6.0 | 13.0 | 7 | — |
| | 高产体系 1 High yield 1 | 1 518 | 05-20 | 8.0 | 16.0 | 10 | 23.08 |
| | 高产体系 2 High yield 2 | 1 600 | 04-30 | 8.0 | 16.8 | 9 | 29.23 |
| 半干旱区 Semi-arid region | 当前 Current | 1 518 | 04-30 | 6.0 | 12.3 | 8 | — |
| | 高产体系 1 High yield 1 | 1 518 | 05-20 | 7.5 | 15.2 | 9 | 23.58 |
| | 高产体系 2 High yield 2 | 1 600 | 04-30 | 7.5 | 15.7 | 12 | 27.64 |



品种和密度，表现出较高的增产潜力，尤其以优化品种增产幅度最大，因此生产上应根据不同地区气候条件尽可能选用生育期长、适应能力强、稳定系数高的品种来进一步提高玉米的产量潜力。

## 3 讨论

播期是影响玉米产量的重要因素之一[27]，播期不同引起作物生长的光温条件不同，而温度和光照又是影响生育期的主要生态因子[28–29]。前人研究表明，推迟播期后所带来的温度变化是影响玉米生育期持续时间长短及产量高低的主要原因[30]。本研究从播期情景模拟的结果可以看出，半湿润和半干旱地区随播期推迟，虽然全生育期缩短，总辐射量减少，但生育后期温度降低，使作物生殖生长期延长，从而截获更多的光照资源，因此推迟播期有利于产量潜力的提高。而湿润区由于整个生育期气温较低，虽然低温使入射的光辐射较高，但是生殖生长期间的低温(<19 ℃)可能会严重影响玉米叶片的光合作用和籽粒的灌浆进程[31]，且随着播期推迟生物量减少，收获指数下降，进而导致产量降低，同时也验证了前人关于播期改变带来温度变化是影响玉米产量变化的结论[30]。因此湿润区不同于其他地区，在生产上要提早播种，以便充分利用有限的热量资源。

种植密度是影响作物产量最敏感的因素之一[32]，合理的密度是构建良好群体结构，充分利用光热资源的基础，有利于玉米群体源库比协调发展[33]。在当前品种和播期条件下，吉林省不同生态区对密度的模拟效应表明：种植密度小于 75 000 株·hm$^{-2}$ 时，随着密度的增加，收获指数呈增加趋势，而增加密度主要是增加了源的供应，说明源是限制因子；当种植密度大于 75 000 株·hm$^{-2}$ 时收获指数开始降低，说明密度增加导致了库成为限制因子。进一步增密后各地区增产潜力不大，在半干旱地区，当密度超过 75 000 株·hm$^{-2}$ 时，产量便开始下降，在实际的生产条件下，过高的种植密度会带来更大病虫害和倒伏等风险。

最好的玉米品种是能够充分利用当地所有光温资源的品种，理论上生长季较长的品种无疑是好的选择[34]，尤其生殖生长季越长，光辐射截获就越多，产量和收获指数就越高[35]；生长期较短的品种会因叶面积指数较小，减少光辐射的截获，导致生物量减少和收获指数的降低[34]。但在高纬度的东北地区，前期温度低，后期光温资源下降较快，生长季长的品种可能会在生殖生长季遇到不利的气象条件，使产量变异较大，稳产性下降[36]。本研究不同品种情景模拟结果表明，适应当地生态条件的品种可能是长期产量潜力最好的品种，生长季过长的品种会因生长后期气象条件变异，其产量潜力变异也会增大。因此，在当前吉林省不同生态区的生产条件下，品种选择应因地制宜，尽可能选择中晚熟、晚熟品种。

综合以上分析，从播期模拟结果可知，产量偏低的主要原因是灌浆时间短引起的库容不足，提高产量需要扩库，在热量资源充足的地区推迟播期具有扩库的作用；而在当前播期条件下，增加密度也是扩库强源的重要手段，但过高密度会使库成为新的限制因子，生产上可以通过推迟播期和适当增密相结合的策略充分利用后期的光温资源，延长籽粒灌浆持续期，进而满足库的需求；如果选用长生育期的品种不仅可以增加库容量，而且保证不降低源强度，但前提是保证玉米生育期所需有效积温比较

稳定，玉米能够正常成熟，形成较高产量。因此，最佳策略是将品种、播期和密度结合起来，通过适时播种和增加密度来改变籽粒的灌浆速率或灌浆持续期，通过选择生育期长的品种来增加前期生物量，为后期生殖生长提供物质基础，前者有利于关键时期的籽粒建成和后期灌浆，后者有利于生育后期叶片的缓慢衰老和光合产物的有效转移。上述研究与分析均表明了 Hybrid-maize 模型在高产体系构建中的作用，具有较强的理论和实践参考价值。

## 4　结论

本研究以产量潜力和产量潜力变异为主要依据，同时考虑实际操作的可行性及品种本身的生产特性，对吉林省不同生态区的玉米增产潜力进行了定量分析，在此基础上构建了不同生态区的玉米高产体系，主要结论如下：1)改变播期是一项重要的增产措施，但不同生态区的表现不同。通过模型模拟分析得出，在湿润区应选择早播，播种日期在 4 月 20 日左右比较适宜；而半湿润区和半干旱区的适宜播种期应在 5 月中旬左右。2)从不同地点在当前播期和品种条件下对增加密度的反应来看，湿润区的适宜密度为 90 000 株·$hm^{-2}$ 左右，半湿润区的适宜密度在 80 000 株·$hm^{-2}$ 左右，而半干旱区密度不应超过 75 000 株·$hm^{-2}$。3)在当前的播期和密度条件下，适应各地区生态条件的当前品种(GDD=1 500 ℃左右)可能是长期产量潜力最好的品种，但是选用生育期更长的品种将有更高的产量潜力。4)将以上几种管理措施进行优化结合，与当前的生产技术相比，高产体系产量增产潜力为 14.39%~29.23%。

## 参考文献　References


[1] 国家统计局农村经济社会调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 142–154
National Bureau of Statistics of China Rural Social and Economic Investigation Department. China Rural Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014: 142–154

[2] 王滨. 吉林: 世界黄金玉米带上的明珠[J]. 黑龙江粮食, 2014(8): 35–36
Wang B. Jilin: The bright pearl of world golden corn belt[J]. Heilongjiang Grain, 2014(8): 35–36

[3] 王立春, 边少锋, 任军, 等. 提高春玉米主产区玉米单产的技术途径研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 83–85
Wang L C, Bian S F, Ren J, et al. Study on technique way to increase unit area yield in the main production zone of spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 83–85

[4] 路海东, 薛吉全, 张德华, 等. 陕西不同生态区玉米超高产的潜力和途径探索[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2007, 10(4): 20–24
Lu H D, Xue J Q, Zhang D H, et al. Potentials and approaches to maize super high yield in different ecotopes of Shaanxi Province[J]. Journal of Xi'an University of Arts & Science: Natural Science Edition, 2007, 10(4): 20–24

[5] 曹云者, 刘宏, 王中义, 等. 基于作物生长模拟模型的河北省玉米生产潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 826–832
Cao Y Z, Liu H, Wang Z Y, et al. Potential productivity of maize based on model simulation in Hebei Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 826–832

[6] 刘毅, 李世清, 陈新平, 等. 黄土旱塬 Hybrid-Maize 模型适应性及春玉米生产潜力估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 302–308
Liu Y, Li S Q, Chen X P, et al. Adaptability of Hybrid-Maize model and potential productivity estimation of spring maize on dry highland of loess plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 302–308

[7] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 等. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525–534
Liu B H, Chen X P, Cui Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 525–534

[8] Aggarwal P K, Kalra N. Analyzing the limitations set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat 2: Climatically potential yields and management strategies[J]. Field Crops Research, 1994, 38(2): 93–103

[9] 陈国平, 高聚林, 赵明, 等. 近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 80–85
Chen G P, Gao J L, Zhao M, et al. Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize super-high yield plots in recent years[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 80–85

[10] 赵致, 张荣达, 吴盛黎, 等. 紧凑型玉米高产栽培理论与技术研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5): 537–543
Zhao Z, Zhang R D, Wu S L, et al. Study on theory and technology of growing for high-yield in compact corn[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(5): 537–543

[11] 马兴林, 王庆祥, 钱成明, 等. 不同施氮量玉米超高产群体特征研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 158–162
Ma X L, Wang Q X, Qian C M, et al. Canopy characteristics of super-high yielding maize under different nitrogen application[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 158–162

[12] 段宗颜, 肖焱波, 苏凡, 等. 玉米高产栽培的氮肥优化调控技术研究[J]. 中国农业科技导报, 2002, 4(4): 40–43
Duan Z Y, Xiao Y B, Su F, et al. Optimizing N rate under high yield corn cultivation system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2002, 4(4): 40–43

[13] 陈国平, 杨国航, 赵明, 等. 玉米小面积超高产创建及配套栽培技术研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 1–4
Chen G P, Yang G H, Zhao M, et al. Studies on maize small area super-high yield trails and cultivation technique[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 1–4

[14] 王志刚, 高聚林, 张宝林, 等. 内蒙古平原灌区高产春玉米(15 t·$hm^{-2}$ 以上)产量性能及增产途径[J]. 作物学报, 2012,

38(7): 1318–1327
Wang Z G, Gao J L, Zhang B L, et al. Productivity performance of high-yield spring maize and approaches to increase grain yield (above 15 t·ha$^{-1}$) in Irrigated Plain of Inner Mongolia[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(7): 1318–1327

[15] Hammer G L, Kropff M J, Sinclair T R, et al. Future contributions of crop-modeling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 18(1/2): 15–31

[16] 吴绍洪, 靳京, 戴尔阜. 基于 PS123 作物生长模型的黑龙江海伦市玉米生产潜力计算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 93–97
Wu S H, Jin J, Dai E F. PS123 crop growth model based method to calculate potential maize productivity in Hailun, Heilongjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 93–97

[17] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914–1925
Wang J, Yang X G, Lü S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1914–1925

[18] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 555–560
Li J, Wang L X, Shao M A, et al. Simulation of maize potential productivity in the Loess Plateau region of China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 555–560

[19] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30–36
Dai M H, Tao H B, Liao S H, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 30–36

[20] Yang H S, Dobermann A, Lindquist J L, et al. Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches[J]. Field Crops Research, 2004, 87(2/3): 131–154

[21] Bai J S, Chen X P, Dobermann A, et al. Evaluation of NASA satellite- and model-derived weather data for simulation of maize yield potential in China[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(1): 9–16

[22] 侯鹏, 陈新平, 崔振岭, 等. 基于Hybrid-Maize模型的黑龙江春玉米灌溉增产潜力评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 103–112
Hou P, Chen X P, Cui Z L, et al. Evaluation of yield increasing potential by irrigation of spring maize in Heilongjiang Province based on Hybrid-Maize model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 103–112

[23] Meng Q F, Hou P, Wang L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 91–97

[24] Grassini P, Yang H S, Cassman K G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(8): 1254–1265

[25] Setiyono T D, Yang H, Walters D T, et al. Maize-N: A decision tool for nitrogen management in maize[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(4): 1276–1283

[26] Timsina J, Jat M L, Majumdar K. Rice-maize systems of South Asia: Current status, future prospects and research priorities for nutrient management[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 65–82

[27] 曹庆军, 杨粉团, 陈喜凤, 等. 播期对吉林省中部春玉米生长发育产量及品质的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 71–75
Cao Q J, Yang F T, Chen X F, et al. Effects of sowing date on growth, yield and quality of spring maize in the central area of Jilin Province[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5): 71–75

[28] 李绍长, 白萍, 吕新, 等. 不同生态区及播期对玉米籽粒灌浆的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 775–778
Li S C, Bai P, Lü X, et al. Ecological and sowing date effects on maize grain filling[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 775–778

[29] 董红芬, 李洪, 李爱军, 等. 玉米播期推迟与生长发育、有效积温关系研究[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 97–101
Dong H F, Li H, Li A J, et al. Relations between delayed sowing date and growth, effective accumulated temperature of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 97–101

[30] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18–23
Liu M, Tao H B, Wang P, et al. Effect of sowing date on growth and yield of spring-maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 18−23

[31] Andrade F H, Uhart S A, Cirilo A. Temperature affects radiation use efficiency in maize[J]. Field Crops Research, 1993, 32(1/2): 17–25

[32] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1737–1743
Liu W, Lü P, Su K, et al. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1737–1743

[33] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1247–1253
Ma G S, Xue J Q, Lu H D, et al. Effects of planting date and density on population physiological index of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1247–1253

[34] Burns H A, Abbas H K. Planting date effects on Bt and non-Bt corn in the mid-south USA[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(1): 100–106

[35] Capristo P R, Rizzalli R H, Andrade F H. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(4): 1111–1118

[36] Ruget F. Contribution of storage reserves during grain-filling of maize in Northern European conditions[J]. Maydica, 1993, 38(1): 51–59